

Д-р техн. наук, проф. **О.Я.КОКОРИН**
МГСУ
Ф.И.АНДРОНОВ
«ВЕЗА»

Системы кондиционирования воздуха для чистых помещений

Развитие современных высокотехнологичных производств связано с необходимостью создания в производственных помещениях воздушной среды повышенной чистоты, поддержания в них постоянных температуры и относительной влажности воздуха, а также соблюдения ограничений по скорости движения воздуха.

Помещения для производств с такими требованиями к внутренней воздушной среде получили специальное название «чистые помещения».

По степени чистоты воздуха чистые помещения по европейскому стандарту 209В(с) делятся на шесть классов (см. таблицу).

Перед поступлением в чистые помещения приточный воздух подвергают многоступенчатой очистке: последовательно пропускают через фильтры различной эффективности. Число ступеней очистки зависит от требуемого класса чистоты воздуха. Так, приточный воздух, направляемый в чистые помещения класса 3, проходит тройную очистку. Первая ступень осуществляется в фильтре EU4; вторая ступень — в фильтре EU7; третья — в концевом фильтре класса абсолютной чистоты, который располагается в потолке чистой комнаты. Концевые фильтры заменяют через 14 дней.

Чистые помещения создают в объеме производственной площади здания путем выгораживания специальными модульными перегородками внутренних помещений. Ограждающие перегородки выполняют из модульных конструкций, изготовленных из двойных стальных листов толщиной 1 мм с тепловой изоляцией между листами. Стальные листы окрашивают путем напыления порошковой краски с последующим ее оплавлением. Это создает устойчивую поверхность окрашенного листа и предотвращает выветривание частиц с поверхности панелей. Конструкция вертикальных стеновых

Air conditioning systems for «clean rooms» are described. The operation of the central air conditioning system according to energy-saving technology is offered when only outside air is cooled and dehumidified in the central air conditioner. Capital expenditures and energy consumption during operation are considerably reduced in this case.

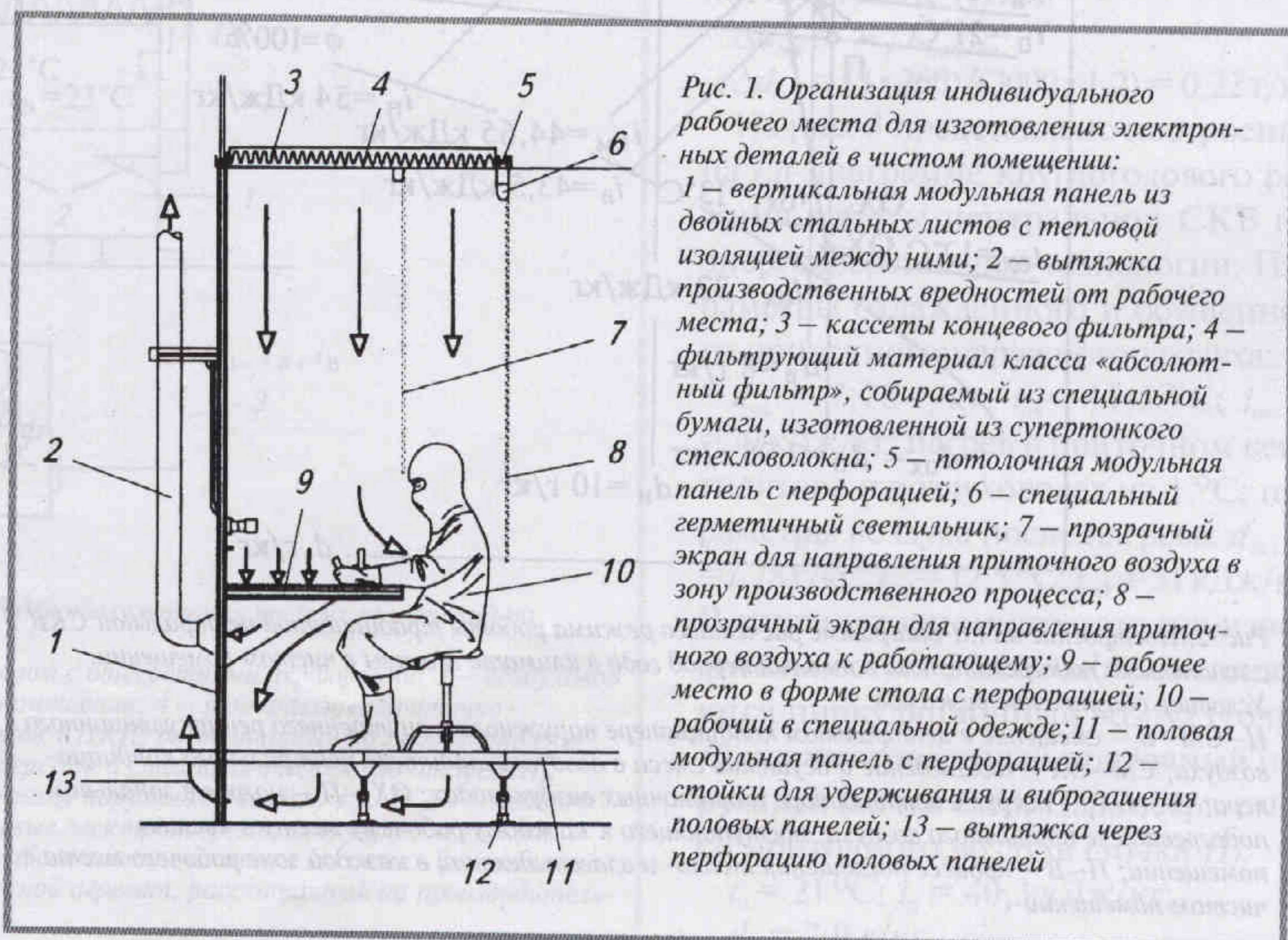
панелей может иметь одинарное и двойное герметичное остекление. При сборке ограждающих вертикальных перегородок с потолочными и половыми панелями используют виброгасящие вставки.

Индивидуальное рабочее место в чистом помещении показано на рис. 1. Концевой фильтр абсолютной очистки вторичного воздуха в чистых помещениях располагают над перфорацией потолочных панелей. Фильтрующий материал изготовлен

из супертонкого волокна в форме листов, которые укладывают в каркас фильтра в форме складок, что обеспечивает увеличение площади фильтрующей поверхности по отношению к фасадному сечению фильтра. При удельной нагрузке на выходе в фасадном сечении кассеты фильтра 2000 (м³/ч)/м² коэффициент очистки составляет 99,995 % при размере частиц до 0,3 мкм. Очищенный приточный воздух выходит через отверстия в перфорации пото-

Класс чистоты	Число частиц в 1 м³ воздуха, не более	Размер частиц, мкм, не более	Кратность воздухообмена, объемов в 1 ч	Удельная производительность приточных систем, м³/ч на 1 м² площади пола
6	100 000	0,5	25	60...75
5	10 000	0,5	40...60	100...180
4	1 000	0,5	120...300	360...900
3	100	0,5	360...500	1000...1600
2	10	0,5	500...600	1600...1800
1	1	0,5*	500...600	1600...1800

Примечание. Высота помещений 3 м.
*Размер одной частицы может превышать 0,5 мкм.



лочных панелей со скоростью не более 0,5 м/с и перепадом температур

$$\Delta t = (t_b - t_n),$$

где t_b , t_n — соответственно температуры воздуха помещений рабочей зоны и приточного воздуха.

Такой перепад отвечает условиям поглощения расчетных теплоизбытков при поддержании требуемой точности температуры t_b в рабочей зоне.

Вытяжка воздуха осуществляется через два устройства. Загрязненный и отопленный воздух от места проведения технологического производства через отверстия в перфорированном рабочем месте отсасывается вытяжной системой на выброс в атмосферу с температурой t_y (температура удаляемого воздуха). Внутренний воздух с температурой t_b через отверстия в перфорации пола поступает на рециркуляцию в приточный агрегат. В целях улучшения санитарно-гигиенических условий проведения работ приточный поток воздуха прозрачными вертикальными перегородками направляется к рабочему месту и работающему.

На рис. 2 показано построение на i, d -диаграмме режима работы традицион-

ной центральной СКВ на базе технологических блоков КЦКП (см. каталог фирмы «Веза» «Кондиционеры центральные, каркасно-панельные КЦКП») с зональными воздухоподогревателями на базе канальных воздухонагревателей КВН (авторы располагают информационными материалами Ultraclean фирмы WEISS TECHNIK).

В центральном приточном агрегате готовится круглый год смесь наружного воздуха (санитарная норма не менее 60 м³/ч на каждого работающего в чистом помещении) и рециркуляционного, поступающего через отверстия в полу в пространство, которое называется фальшполом. Для схемы организации рабочего места, представленной на рис. 1, характерно наличие местной вытяжки загрязненного и отопленного воздуха через отверстия в рабочем столе.

Скорость воздуха в отверстиях всасывания должна обеспечить забор образующихся частиц пыли.

Принимаем, что чистое помещение имеет площадь $S = 30$ м² и в нем обеспечивается класс чистоты 3. Тогда по требованию стандарта 209B(c) в чис-

тое помещение должно поступать приточного воздуха (м³/ч) не менее

$$L_n = S l_n,$$

где l_n — удельная производительность приточных систем по требованию стандарта, м³/(ч·м²);

$$L_n = 30 \cdot 1000 = 30\,000 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

В помещениях имеется три рабочих стола, через отверстия в перфорации которых отсасывается загрязненный, загазованный и отопленный воздух, вытяжной системой, имеющей производительность (м³/ч):

$$L_y = M l_y,$$

где M — число рабочих мест;

l_y — количество загрязненного, загазованного и отопленного воздуха, отсасываемого вытяжной системой, м³/ч.

Принято, что $l_y = 1000$ м³/ч, тогда

$$L_y = 3 \cdot 1000 = 3000 \text{ м}^3/\text{ч},$$

что составляет 10 % от общего приточного и больше санитарной нормы на трех работающих:

$$L_{п.н.мин} = M \cdot 60 = 3 \cdot 60 = 180 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

В приточный агрегат будет поступать 3000 м³/ч приточного наружного воздуха и 27 000 м³/ч рециркуляционного. На входе приточного воздуха в приточном воздуховоде к каждому рабочему месту монтируют канальный воздухонагреватель КВН фирмы «Веза».

В зоне проведения технологического процесса круглый год поддерживают следующие параметры воздуха: температура $t_b = 23 \pm 1$ °C; относительная влажность $\phi_b = 45 \pm 5$ %; влагосодержание $d_n = 8$ г/кг; удельная энтальпия $i_b = 43,5$ кДж/кг. Чистое помещение сооружают в климате Москвы, где в теплый период расчетные параметры Б: $t_n = 28,5$ °C; $d_n = 10$ г/кг; $i_n = 54$ кДж/кг.

На рис. 2 показано построение i, d -диаграмме расчетного режима работы центральной СКВ в теплый период года. Наружный (точка Н) и вытяжной рециркуляционный воздух (точка В) смешиваются. Параметры смеси: $i_{см} = 44,65$ кДж/кг; $t_{см} = 24$ °C; $d_{см} = 8,2$ г/кг. При тяжелой работе трех человек выделяется влаги:

$$W = L w,$$

где w — количество влаги от одного работающего, г/ч; в соответствии с СНиП 2.04.05-91 $w = 260$ г/(чел·ч).

Таким образом,

$$W = 3 \cdot 260 = 780 \text{ г/ч}.$$

Требуемая поглотительная (ас-

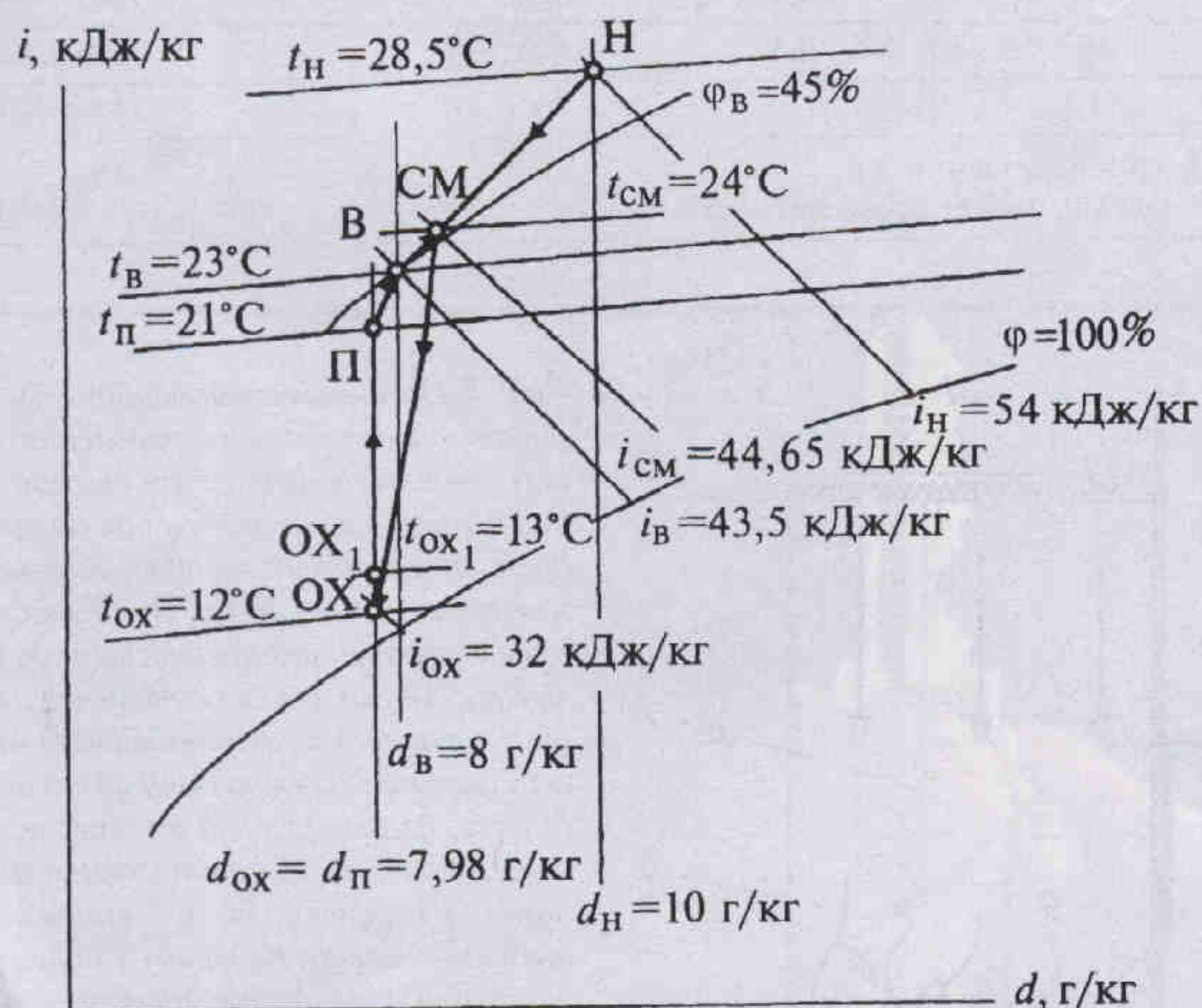


Рис. 2. Построение на i, d -диаграмме расчетного режима работы традиционной центральной СКВ с зональными подогревателями в теплый период года в климате Москвы в чистом помещении. Условное обозначение режимов:

Н—СМ—В — смешение в центральном кондиционере наружного и внутреннего рециркуляционного воздуха; СМ—ОХ — охлаждение и осушение смеси в воздухоохладителе центрального кондиционера; ОХ—ОХ₁ — нагрев в вентиляторе и приточных воздуховодах; ОХ₁—П — нагрев в зональном подогревателе приточного воздуха, поступающего к каждому рабочему месту в чистом помещении; П—В — процесс поглощения тепло- и влаговыделений в каждой зоне рабочего места в чистом помещении

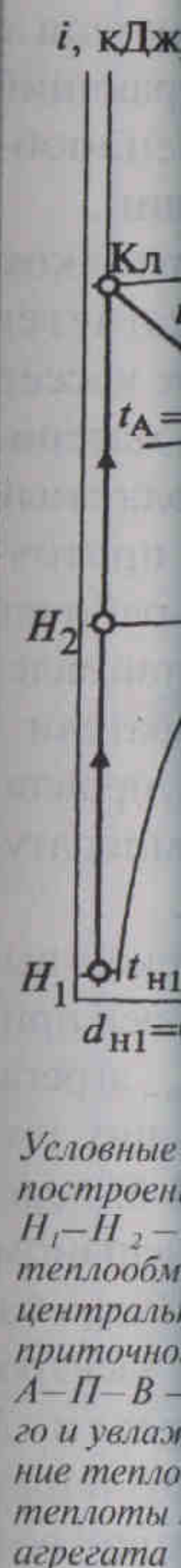


Рис. 4. При энергосбережении 1 — чистое рециркуляционное очистительное устройство $L_n = L$ рассчитанный воздухообмен датчика контроля над производительностью по вы-

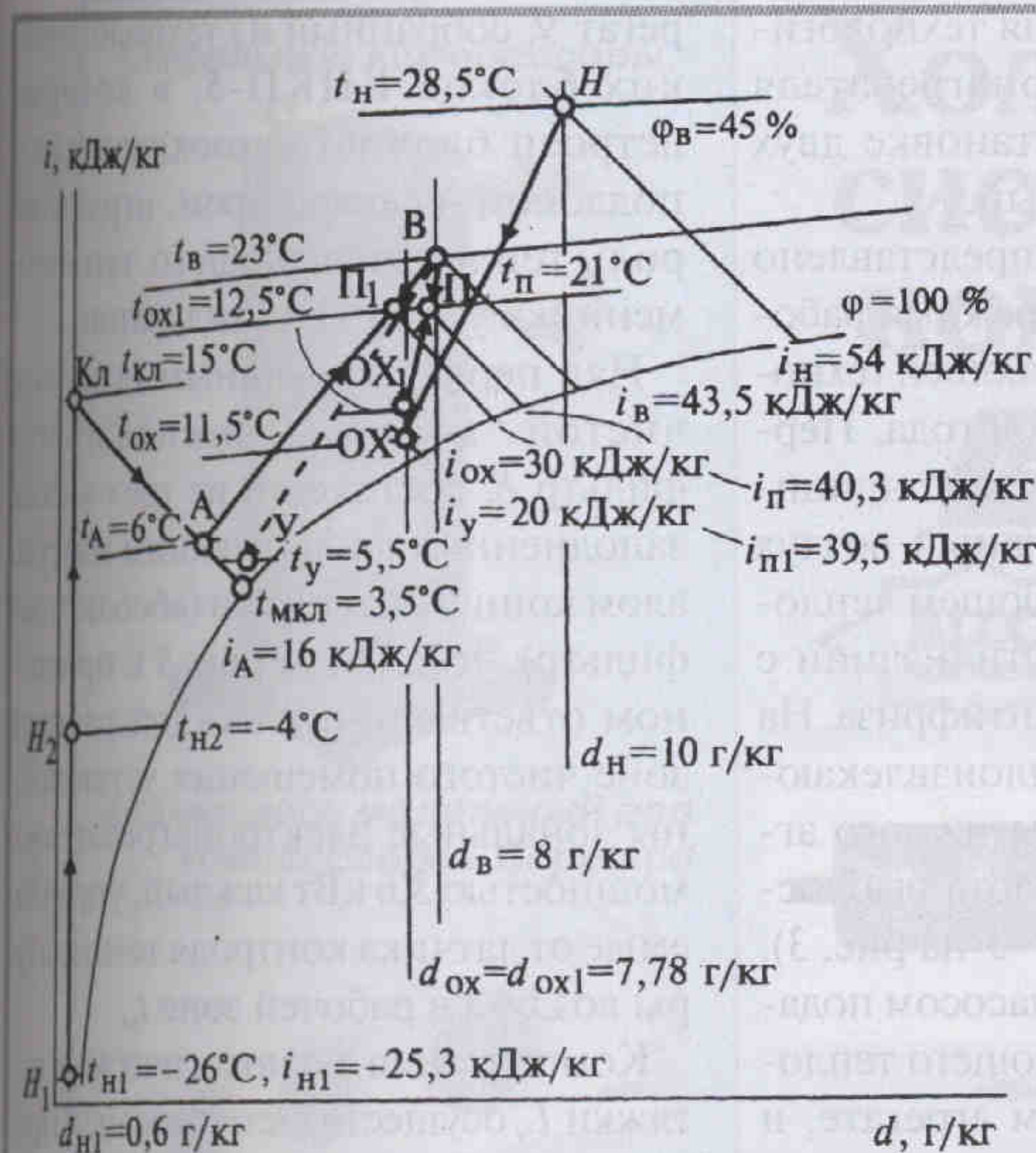


Рис. 3. Построение на i, d -диаграмме расчетных круглогодичных режимов работы предлагаемой центральной СКВ для обслуживания чистых помещений по энергосберегающей технологии. Условные обозначения для расчетного режима работы СКВ в теплый период года (правая часть построения): Н-ОХ — охлаждение и осушение приточного наружного воздуха $L_{п.н.}$, количество которого равно количеству удаляемого вытяжного воздуха L_y ; ОХ-ОХ₁ — нагрев в приточном вентиляторе; ОХ₁-П-В — смешение приготовленного наружного приточного и рециркуляционного воздуха в вентиляторном очистительном агрегате; П-В — поглощение тепло- и влаговыделений на каждом рабочем участке чистого помещения.

Условные обозначения для расчетного режима работы СКВ в холодный период (левая часть построения): Н₁-Н₂ — нагрев приточного наружного воздуха в центральном кондиционере в теплоотдающем теплообменнике утилизируемой теплоты вытяжного воздуха; Н₂-Кл — нагрев в калорифере центрального кондиционера приточного наружного воздуха; Кл-А — адиабатное увлажнение приточного нагретого воздуха в орошаемом сотовом блоке центрального кондиционера; А-П-В — смешение в смесительном блоке вентиляторного очистительного агрегата нагретого и увлажненного приточного наружного воздуха и рециркуляционного воздуха; П-В — поглощение тепло- и влаговыделений на каждом рабочем участке чистого помещения; В-У — извлечение теплоты из вытяжного удаляемого воздуха в теплоизвлекающем теплообменнике вытяжного агрегата

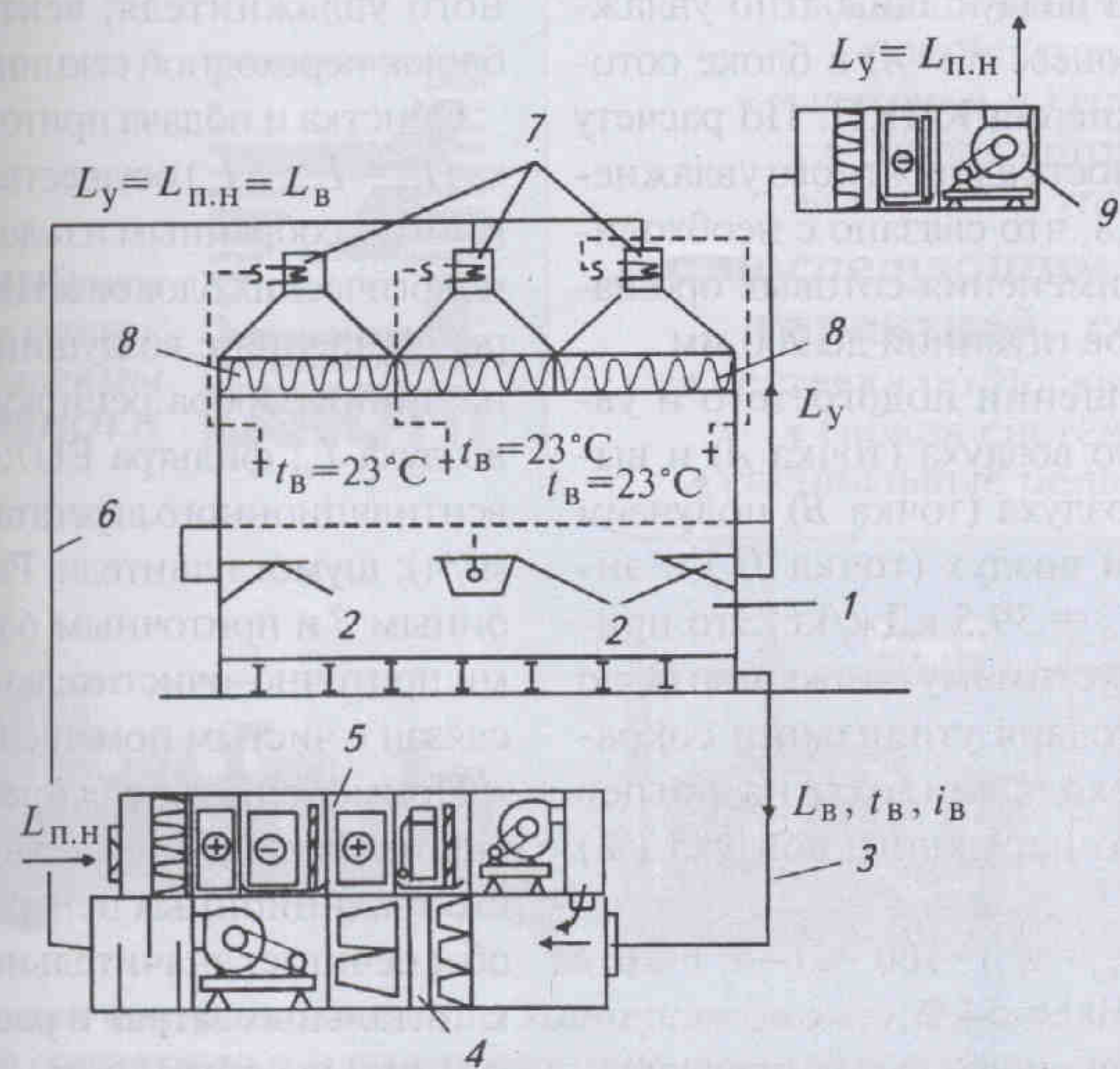


Рис. 4. Принципиальная схема центральной СКВ для обслуживания чистых помещений по энергосберегающей технологии: 1 — чистое помещение; 2 — рабочее место со столом с отверстиями перфорации; 3 — воздуховод рециркуляции воздуха $L_{п.н.}$ из фальшпола чистого помещения; 4 — центральный приточно-очистительный агрегат из технологических блоков КЦКП, рассчитанный на производительность $L_{п.н.} = L_{п.н.} + L_y$; 5 — центральный приточный агрегат из технологических блоков КЦКП, рассчитанный на производительность по приточному наружному воздуху $L_{п.н.} = L_y$; 6 — приточный воздуховод к чистому помещению; 7 — концевые электронагреватели, управляемые от датчика контроля температуры t_a ; 8 — фильтр абсолютной очистки в кассетах, расположенный над перфорированным потолком; 9 — вытяжной агрегат, рассчитанный на производительность по вытяжному выбросному воздуху L_y

милирующая) способность приточного воздуха (г/кг):

$$\Delta d_{ac} = W / (L_{п.н.} \rho_{п.н.}),$$

где $\rho_{п.н.}$ — плотность приточного воздуха;

$$\Delta d_{ac} = 780 / (30\,000 \cdot 1,2) = 0,02 \text{ г/кг.}$$

Охлаждение и осушение приточного воздуха происходят в блоке воздухоохладителя КЦКП, питаемом холодной водой с температурой 7 °С. Принятые параметры охлаждаемого воздуха:

$$t_{ox} = 12 \text{ °С}; d_{ox} = 7,98 \text{ г/кг}; i_{ox} = 32 \text{ кДж/кг.}$$

Расход холода (Вт)

$$Q_{х.ох} = L_{п.н.} \rho_{п.н.} (i_{см} - i_{ox}) / 3,6,$$

где $i_{см}$ — энтальпия смеси, кДж/кг;

$$Q_{х.ох} = 30000 \cdot 1,2 (44,65 - 32) / 3,6 = 126\,500 \text{ Вт.}$$

По условиям обеспечения требуемой точности поддержания температуры $t_b = 23 \text{ °С}$ температуру приточного воздуха в каждой зоне принимаем $t_{п.н.} = 21 \text{ °С}$.

Расход теплоты в трех зональных подогревателях (Вт):

$$Q_{кл.зн} = L_{п.н.} \rho_{п.н.} c_p (t_{п.н.} - t_{ox1}) / 3,6,$$

где c_p — удельная теплоемкость воздуха, кДж/(кг · К);

$$Q_{кл.зн} = 30\,000 \cdot 1,2 \cdot 1 (21 - 13) / 3,6 = 80\,000 \text{ Вт.}$$

Предлагается вариант работы центральной СКВ по энергосберегающей технологии, когда в центральном кондиционере из блоков КЦКП охлаждается и осушается только приточный наружный воздух. Поглотительная (ассимилирующая) способность по влаге (г/кг):

$$\Delta d_{ac1} = W / L_{п.н.} \rho_{п.н.};$$

$$\Delta d_{ac1} = (3 \cdot 260) / (3000 \cdot 1,2) = 0,22 \text{ г/кг.}$$

На рис. 3 представлено построение на i, d -диаграмме круглогодичного режима работы центральной СКВ по энергосберегающей технологии. Параметры охлажденного и осушенного приточного наружного воздуха:

$$d_{ox} = 7,78 \text{ г/кг}; t_{ox} = 11,5 \text{ °С}; i_{ox} = 30 \text{ кДж/кг}; \text{нагрев в приточном вентиляторе и воздуховодах на } 1 \text{ °С}; \text{параметры воздуха после нагрева: } d_{ox1} = 7,78 \text{ г/кг}; t_{ox1} = 12,5 \text{ °С}; i_{ox1} = 31 \text{ кДж/кг.}$$

В вентиляторном агрегате производительностью 30 000 м³/ч смешиваются циркуляционный воздух (точка В) и приготовленный приточный наружный (точка ОХ₁). Параметры смеси приточного воздуха (точка П):

$$t_{п.н.} = 21 \text{ °С}; i_{п.н.} = 40,3 \text{ кДж/кг};$$

$$d_{п.н.} = 7,9 \text{ г/кг.}$$

Полученная смесь проходит двухступенчатую очистку в фильтрах EU4 и EU7 в вентиляторном очистительном агрегате, собранном из блоков КЦКП.

Расход холода на охлаждение и осушение только приточного наружного воздуха (Вт):

$$Q_{\text{х.ох.п.н}} = L_{\text{п.н}} \rho_{\text{п.н}} (i_{\text{н}} - i_{\text{ох}}) / 3,6;$$

$$Q_{\text{х.ох.п.н}} = 3\,000 \cdot 1,19(54 - 30) / 3,6 = 23\,800 \text{ Вт.}$$

Расхода теплоты в теплый период года на подогрев смеси приточного воздуха в энергосберегающем режиме по построению на рис. 3 нет.

Оценим снижение расходов холода на охлаждение приточного воздуха в предлагаемой СКВ по сравнению с традиционной центральной:

$$Q_{\text{х.ох}} / Q_{\text{х.ох.п.н}} = 126\,500 / 23\,800 = 5,3.$$

Таким образом, в предлагаемой СКВ расход холода в 5,3 раза ниже, чем в традиционной. Расхода теплоты в зональных подогревателях в расчетных режимах работы предлагаемой СКВ в режиме на рис. 3 нет.

Для повышения температуры приточного воздуха в случае снижения технологических тепловыделений на рабочем месте к потолочной панели над каждым рабочем местом предусмотрен отвод приточного воздуха от общего приточного воздуховода с установкой концевых канальных электронагревателей от технологических блоков КЦКП мощностью, равной 50 % расчетной охлаждающей способности приточного воздуха в рабочую зону.

Расчетная охлаждающая способность приточного воздуха в каждую рабочую зону чистого помещения составляет

$$Q_{\text{х.ас}} = L_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_p (t_{\text{в}} - t_{\text{н}}) / 3,6 =$$

$$= 10\,000 \cdot 1,2 \cdot 1(23 - 21) / 3,6 = 6670 \text{ Вт.}$$

Удельная охлаждающая нагрузка на одно рабочее место (на 10 м²)

$$q_{\text{х.ас}} = 6670 / 10 = 667 \text{ Вт/м}^2.$$

Расчетная удельная охлаждающая нагрузка на рабочем месте в чистом помещении может колебаться от 1000 до 40 Вт/м².

Требуемая точность поддержания постоянства температур $t_{\text{в}}$ на рабочем месте задана: $t_{\text{в}} = 23 \pm 1$ °С. Поэтому при сокращении технологических тепловыделений допустимо снижение $t_{\text{в}}$ до 22 °С. Дальнейшее снижение компенсируется автоматическим включением зонального электронагревателя, установленная мощность

которого 3,6 кВт, что для технологического блока электронагревателя КЦКП-6,3 отвечает установке двух ТЭНов по 1,8 кВт каждый.

В левой части рис. 3 представлено построение расчетного режима работы СКВ по энергосберегающей технологии в холодный период года. Первоначально в центральном кондиционере приточный наружный воздух нагревается в теплоотдающем теплообменнике установки утилизации с насосной циркуляцией антифриза. На нагрев антифриза в теплоизвлекающем теплообменнике вытяжного агрегата используется теплота выбросного воздуха (процесс $B-U$ на рис. 3). Отогретый антифриз насосом подается в трубки теплоотдающего теплообменника в приточном агрегате, и приточный наружный воздух нагревается (процесс H_1-H_2 на рис. 3). Далее приточный наружный воздух нагревается в калорифере до энтальпии точки K_1 , отвечающей значению энтальпии, требуемой для получения параметров приточного воздуха P_1 при смешении подогретого наружного и рециркуляционного воздуха. Для получения требуемой относительной влажности $\phi_{\text{в}} = 45 \pm 5$ % подогретый приточный воздух адиабатно увлажняется (процесс K_1-A) в блоке сотового увлажнения КЦКП. По расчету эффективность адиабатного увлажнения $E_{\text{а}} = 0,8$, что связано с необходимостью применения сотовых орошаемых блоков глубиной до 200 мм.

При смешении подогретого и увлажненного воздуха (точка A) и вытяжного воздуха (точка B) получаем приточный воздух (точка P_1) с энтальпией $i_{\text{п1}} = 39,5$ кДж/кг. Это приведет к допустимому снижению $\phi_{\text{в}}$ до 43 %. Благодаря утилизации сокращение расхода теплоты на нагрев приточного наружного воздуха (%) составляет

$$(t_{\text{п2}} - t_{\text{пх}}) / (t_{\text{кл}} - t_{\text{пх}}) \cdot 100 = (-4 + 26) / (15 + 26) \cdot 100 = 54 \text{ \%}.$$

Принципиальная схема предлагаемой СКВ для чистых помещений, функционирующая по энергосберегающей технологии, представлена на рис. 4.

В чистом помещении 1 площадью 30 м² устроены три рабочих места 2 с местной вытяжкой от каждого стола через перфорацию в нем. Вытяжной воздух $L_{\text{в}}$ забирается в вытяжной аг-

регат 9, собранный из технологических блоков КЦКП-5, в который встроен блок воздухоохладителя поддоном и сепаратором, играющий роль теплоизвлекающего теплообменника установки утилизации.

Над перфорированным потолком чистой комнаты располагается фильтр 8, состоящий из трех каскадных заполненных фильтрующим материалом концевой очистки (абсолютный фильтр). Над фильтром 8 в приточном ответвлении к каждой рабочей зоне чистого помещения установлены зональные электронагреватели мощностью 3,6 кВт каждый, управляемые от датчика контроля температуры воздуха в рабочей зоне $t_{\text{в}}$.

Компенсация технологической вытяжки $L_{\text{в}}$ осуществляется подачей приточного наружного воздуха $L_{\text{п.н}}$ агрегатом 5, собранным из следующих технологических блоков КЦКП-5: передней панели с воздушным клапаном, управляемым от электропривода, сбалансированного с пускателем электродвигателя вентилятора агрегата, фильтра EU3; теплоотдающего теплообменника установки утилизации; воздухоохладителя с сепаратором и поддоном; калорифера; сотового адиабатного увлажнителя; вентиляторного блока; переходной секции с клапаном.

Очистка и подача приточного воздуха ($L_{\text{п}} = L_{\text{пн}} + L_{\text{в}}$) осуществляются агрегатом 4, собранным из следующих технологических блоков КЦКП-40: камеры смешения с воздушным клапаном на линии забора рециркуляционного воздуха $L_{\text{в}}$; фильтра EU7; приточного вентиляционного агрегата ($L_{\text{п}} = 30\,000$ м³/ч); шумоглушителя. Рециркуляционным 3 и приточным 6 воздуховодами приточно-очистительный агрегат связан с чистым помещением 1.

Применение предлагаемой СКВ по энергосберегающей технологии вместо традиционных центральных СКВ обеспечивает значительное снижение капитальных затрат и расходов энергии при эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог фирмы «Веза»: «Канальные воздухоохладители КВН» (высылается по запросам).
2. Каталог фирмы «Веза»: «Кондиционеры центральные каркасно-панельные КЦКП» (высылается по запросам).